

# Cambios en las coberturas del suelo en Mocoa, Putumayo y su relación con la intensificación de los efectos de las avenidas torrenciales

*Land cover changes in Mocoa, Putumayo and their relationship with the intensification of the effects of torrential floods*

Elsa Adriana Cárdenas Quiroga<sup>a,d</sup>, Martha Catalina Soto Jiménez<sup>b</sup>,  
Carlos Ferney Rodríguez Sánchez<sup>c</sup>

## RESUMEN

En el presente artículo se muestran los resultados de un trabajo enfocado en la identificación de los cambios de coberturas y uso del suelo en el municipio de Mocoa, departamento del Putumayo, con el fin de efectuar una correlación entre dichos cambios y las afectaciones ocasionadas por los eventos de avenida torrencial que se presentan con regularidad en la zona. Para ello, se analizaron mapas de coberturas de los periodos 2000-2002, 2005-2009, 2010-2012 y 2018 y se compararon los resultados con los obtenidos a partir de la generación del índice de vegetación normalizada (NDVI), y con el índice de diferencia normalizada edificada (NDBI).

El área de estudio tiene una extensión de 1305,3 km<sup>2</sup>, de los cuales, para el periodo inicial comprendido entre 2000-2002 992,16 km<sup>2</sup> (el 76,01 %) correspondía a áreas boscosas, y para el siguiente periodo 2005-2009 se presentó una disminución de 947,26 km<sup>2</sup> (72,57 %). Esto se le atribuye de forma discriminada al incremento en las actividades agrícolas en esta parte del territorio colombiano.

Los resultados obtenidos permitirán reconocer las áreas más afectadas por los cambios en el uso del suelo y el crecimiento urbano, a fin de poder establecer estrategias para la recuperación de estas zonas reduciendo los impactos.

**PALABRAS CLAVE:** NDVI, uso de suelo, procesos morfodinámicos, bosque natural, crecimiento urbano, Mocoa

## ABSTRACT

This article shows the results of a study focused on the identification of land cover and land use changes in the municipality of Mocoa, department of Putumayo, to correlate these changes with the effects caused by torrential flood events, which occur regularly in the area. For this purpose, cover maps for the periods 2000-2002, 2005-2009, 2010-2012 and 2018 were analyzed and the results were compared with those obtained from the generation of the normalized vegetation index (NDVI) and the normalized difference built-up index (NDBI).

The study area has an area of 1305,3 km<sup>2</sup>, of which 992,16 km<sup>2</sup> (76,01%) corresponded to forested areas in the initial period 2000-2002, and for the following period 2005-2009 there was a significant decrease to 947,26 km<sup>2</sup> (72,57%). This is attributed to the increase in agricultural activities in this part of the colombian territory.

The results obtained will make it possible to recognize the areas most affected by changes in land use and urban growth, in order to establish strategies for the recovery of these areas and reduce the impacts.

**KEYWORDS:** NDVI, multi-temporal NDVI, land cover, torrential flood, supervised classification, natural forest, urban growth, Mocoa

a Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería, Docente Programa de Ingeniería Ambiental. Cajicá, Colombia. ORCID Cárdenas, E.A.: 0000-0002-8587-4625

b Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería, Egresada Programa de Ingeniería Civil. ORCID Soto, M.C.: 0000-0002-2756-6392

c Universidad Militar Nueva Granada, Facultad de Ingeniería, Egresado Programa de Ingeniería Civil. ORCID Rodríguez, C.F.: 0000-0002-8654-5479

d Autor de correspondencia: [elsa.cardenas@unimilitar.edu.co](mailto:elsa.cardenas@unimilitar.edu.co)

Recepción: 30 de septiembre de 2022. Aceptación: 06 de mayo de 2024

## Introducción

Estudios relacionados con fenómenos de inestabilidad en áreas montañosas muestran que los cambios en el uso y la cobertura del suelo pueden aumentar la susceptibilidad a deslizamientos de tierra por las modificaciones en la topografía. Entender la relación entre los cambios en el uso y cobertura del suelo, y la ocurrencia de los movimientos en masa permite establecer medidas, tanto para la prevención de estos como para una gestión adecuada de los recursos naturales.

Hay varios factores que influyen en la posibilidad de ocurrencia de desprendimientos. Uno de ellos es el cambio de la cubierta del suelo, que no solo tiene incidencia en el proceso natural y, por tanto, en la amenaza por deslizamiento, sino también en la distribución espacial de los elementos de riesgo (Promper, 2014).

Diferentes trabajos señalan que la presencia y el tipo de vegetación en un área determinada pueden influir en los movimientos en masa debido a que actúa como factor estabilizador del suelo al evitar la erosión, absorber el exceso de agua y reducir la presión del agua en el suelo, evitando la saturación de este. La falta de vegetación o la presencia de vegetación inadecuada aumenta la probabilidad de ocurrencia de eventos de movimientos en masa (Glade, 2003).

Algunas actividades antropogénicas importantes, como la construcción de carreteras rurales, el sobrepastoreo, la deforestación, los monocultivos, el riego y otras obras de ingeniería, contribuyen a la inestabilidad del suelo debido a que pueden modificar la estructura original de la vegetación, reducir el refuerzo mecánico de las raíces y disminuir la cohesión del suelo (Reichenbach *et al.*, 2014; Sheela *et al.*, 2017).

Varios desprendimientos o remociones en masa han sido cartografiados en laderas cóncavas y empinadas en diferentes regiones del mundo, especialmente aquellas modificadas para cultivos (Mugagga *et al.*, 2012). Estos fenómenos pueden intensificarse con el aumento de la densidad poblacional, debido a que representa una mayor demanda de infraestructura y tierras agrícolas (Promper *et al.*, 2014).

Los cambios en la cobertura del suelo han desencadenado movimientos en masa catalogados como peligros geomórficos globales reconocidos y

bien documentados, con impactos económicos, sociales y geomorfológicos significativos (Claessens *et al.*, 2007; Knapen *et al.*, 2006; Ngecu y Mathu, 1999). Entre estos procesos se encuentran los flujos de escombros y lodos canalizados, conocidos como “avenidas torrenciales”, caracterizados por su alto potencial destructivo y por alcanzar grandes distancias (Hungri *et al.* 2001; Gutiérrez, 2008).

En el caso de Mocoa, Colombia, las intensas lluvias provocaron deslizamientos de tierra y una avenida torrencial que resultó en la devastación de varios barrios y en la trágica pérdida de más de trescientas vidas. Diversos factores, como las condiciones geológicas y geomorfológicas, así como los cambios en la cobertura del suelo debidos a actividades humanas como la expansión agrícola y la extracción de recursos, contribuyeron a la magnitud de la tragedia (Vásquez en 2018). A esto se suma el crecimiento poblacional de la zona, que ha incrementado el riesgo de avenidas torrenciales. De hecho, entre 1984 y 2017, Mocoa recibió a 35 785 personas desplazadas, muchas de las cuales, sin recursos económicos, se establecieron en áreas vulnerables cercanas a los ríos, exponiéndose así a inundaciones y avenidas torrenciales (Acuña, 2018).

Los análisis de cambios en la cobertura del suelo se realizan mediante diversas metodologías, como el uso de índices como el NDVI y el NDBI, que permiten identificar las modificaciones en la vegetación y en las zonas urbanas edificadas. Estos índices son fundamentales para abordar los problemas ambientales relacionados con los cambios en la cubierta del suelo y optimizar los patrones de uso de este (Yuanmao *et al.*, 2021)

En vista de la influencia de los cambios de cobertura en estos eventos, el objetivo de este trabajo fue identificar la correlación entre los cambios en la cobertura del suelo y el crecimiento urbano en la intensidad de las avenidas torrenciales en Mocoa, comparando coberturas de tierra y análisis de índices como el NDVI y NDBI. Los resultados obtenidos ayudarán a comprender mejor los impactos de estos fenómenos naturales y a desarrollar estrategias de mitigación.

## Metodología

La metodología empleada consistió en identificar los cambios en las áreas de las diferentes coberturas, principalmente naturales, resultado de las actividades antrópicas, y contrastarlos con el inventario de movimientos en masa, con el índice de Vegetación Normalizada NDVI para cada periodo, y después con el resultado del NDVI Multitemporal para reconocer las áreas con mayores cambios entre 2002 y 2016. Finalmente, se calculó el Índice de Diferencia Normalizada Edificada NDBI, cuya diferencia con el NDVI permitió validar el crecimiento urbano.

Para el análisis se utilizaron los mapas de Cobertura de la Tierra. Adaptación de la Metodología Corine Land Cover, para Colombia a una escala de 1:100 000 para los periodos 2000-2002, 2005-2009, 2010-2012 y 2018, elaborados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). El objetivo era identificar las variaciones en las áreas de cada tipo de cobertura, así como verificar el crecimiento del área urbana y los cambios en el uso del suelo que favorecerían movimientos en masa.

Los resultados de la evaluación de los cambios en cada tipo de cobertura fueron comparados con los valores de los índices NDVI y NDBI de los

periodos evaluados, obtenidos a partir de imágenes del Sensor ETM de Landsat 7.

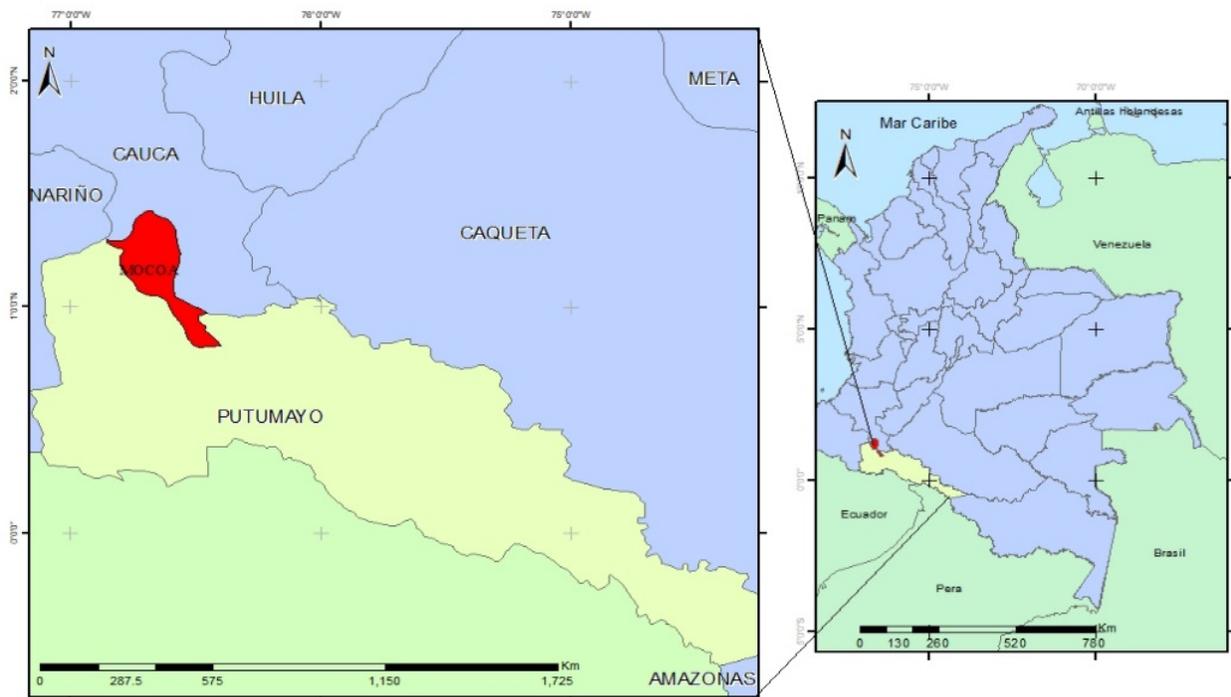
## Localización y caracterización área de estudio

Mocoa, capital del departamento del Putumayo, cuenta con una extensión total aproximada de 1,263 km<sup>2</sup>, 580 km<sup>2</sup> correspondientes al sector urbano y el área restante al sector rural se ubica entre las coordenadas geográficas Lat: 1°08'51" N Long: 76°38'50" O.

Limita con los municipios de Santa Rosa y Tablón por el norte, con los municipios de Santa Rosa, Piamonte (departamento del Cauca) y Puerto Guzmán por el oriente, y el municipio de Puerto Caicedo por el sur. El área urbana del municipio está atravesada por el río Mocoa y sus principales afluentes son los ríos Taruca, Sangoyaco y Mulato (Figura 1).

En cuanto al régimen de precipitaciones, se ha estimado una precipitación media anual de 3 715 mm. Las mayores precipitaciones se registran en el mes de noviembre (135 mm), y menores durante el mes de agosto (45mm). Topográficamente, el sector se caracteriza por una morfología que va de plana a montañosa, con elevaciones que van desde los 600 a

Figura 1. Mapa de localización área de estudio. Elaboración propia



Nota. Fuente: autores

1 800 msnm, y en el sector occidental por cadenas montañosas con pendientes de 75°, así como otros sectores con pendientes moderadas cuyo rango va de 10-25°.

La geología del sector está caracterizada por la presencia de rocas ígneas de edad jurásica y rocas sedimentarias del Cretáceo y del Paleoceno, cubiertas por depósitos cuaternarios.

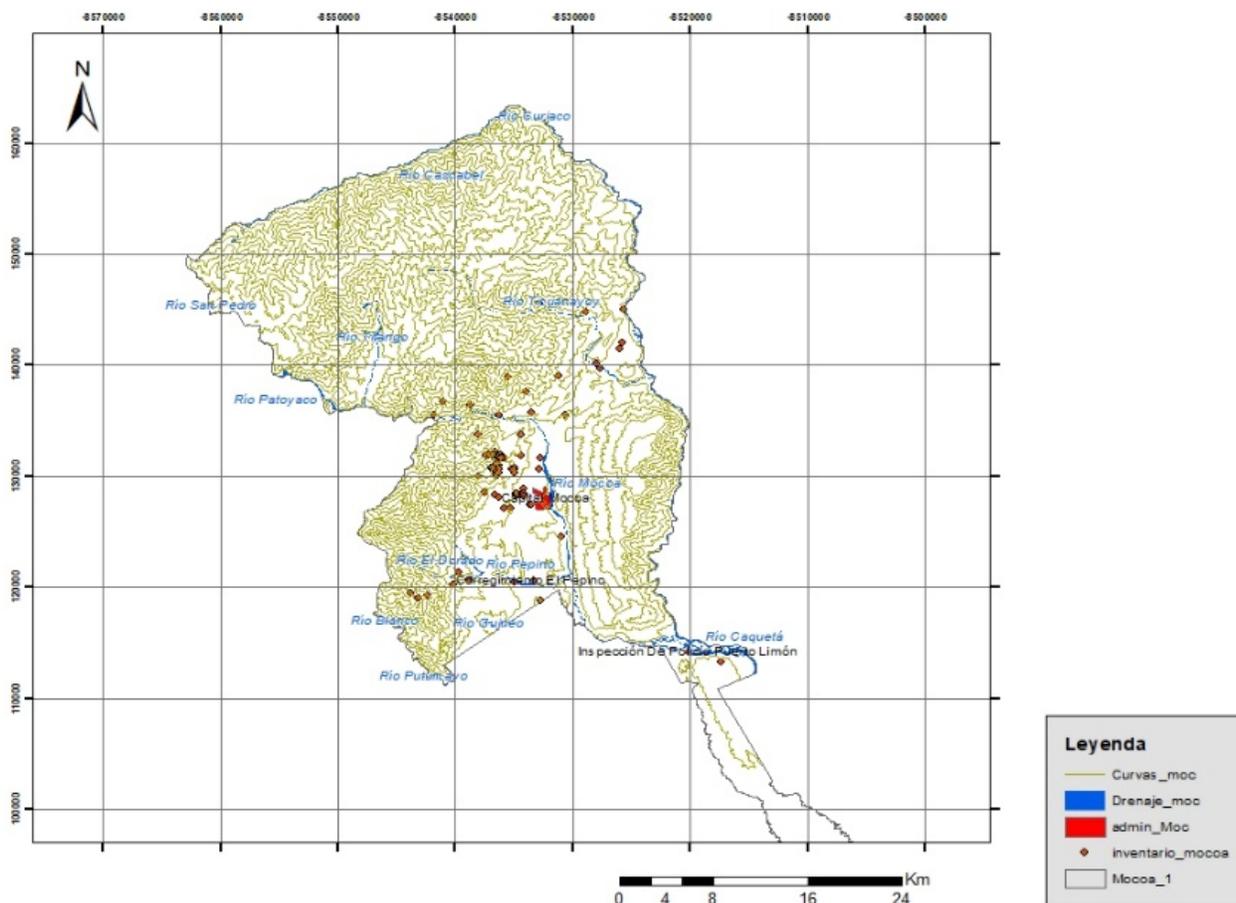
Las rocas sedimentarias son predominantes en el área de estudio, con conglomerados y calizas, además, con rocas ígneas granitos y monzonitas, y los depósitos incluyen: depósitos aluviales de terraza, depósitos coluviales y derrubios de pendiente.

Las rocas ígneas en algunos sectores presentan un intenso fracturamiento y estructuralmente la zona se encuentra controlada por varias fallas, por lo que el material se encuentra frecuentemente desintegrado, lo cual constituye un factor determinante en la ocurrencia de movimientos en masa en la zona.

## Inventario de movimientos en masa

El inventario de movimientos en masa contiene datos recolectados en campo y verificados por el Servicio Geológico Colombiano, que muestran la localización, distribución y clasificación de los tipos de movimientos en masa por departamentos y municipios. Dicha información puede ser consultada y descargada desde el Sistema de Información de Movimientos en masa del Servicio Geológico Colombiano (SGC). El inventario de movimientos en masa para la zona de estudio cuenta con un registro de 86 movimientos en masa reportados entre los años 1962 y 2017, en su mayoría de tipo, deslizamiento, flujo y caída, muchos de ellos ubicados en las laderas que atraviesan los drenajes Taruca, Sangoyaco y Mulatos (Figura 2 y Figura 3).

Figura 2. Inventario movimientos en masa



Nota: Fuente datos abiertos SGC

Figura 3. Movimiento en masa. Mocoa, 2017



Nota. Fuente: propia.

## Detección de Cambios en las coberturas

Para detectar los cambios en las coberturas en el área de estudio se descargaron mapas de Cobertura de la Tierra. Adaptación Metodología Corine Land Cover, para Colombia. Escala 1:100.000, para los periodos 2000-2002, 2005-2009, 2010-2012, y 2018. Esto permite para unificar la escala de la información, teniendo en cuenta que es la cartografía oficial disponible. Se analizaron y compararon los diferentes periodos con el fin de obtener los valores de las áreas de coberturas que fueron modificadas como resultado de las actividades humanas desarrolladas en la zona y como resultado de la expansión urbana.

## Cálculo de índice de Vegetación Normalizada (NDVI)

El índice NDVI utiliza la reflexión diferencial en las bandas roja e infrarroja (IR), con el fin de observar la densidad y estado de salud de la vegetación, empleando la reflectividad espectral de la radiación solar. Así, la vegetación sana presenta una alta reflexión en el rango de longitudes de onda cercanas al infrarrojo, menor que en el rango de longitudes de onda del rojo.

Los valores que se obtienen oscilan entre -1,0 y 1,0. Los valores negativos corresponden a ausencia

de vegetación e incluyen las nubes, el agua y la nieve; los valores cercanos a cero corresponderían a macizos rocosos y terreno desnudo. Valores muy bajos de NDVI, es decir por debajo de 0,1 por ejemplo arena o nieve. Valores moderados representan terrenos con arbustos y pastos (0,2 a 0,3), y los valores altos indican bosques (0,6 a 0,8).

El cálculo del índice NDVI se efectuó a partir de imágenes Landsat 7 y Landsat 8, con una resolución multispectral de 30 metros y pancromática de 15 metros, descargadas previamente de Earth Explorer del USGS, correspondientes a los años 2002, 2008 y 2018. Asimismo, en el momento de la selección de las imágenes se tuvo en cuenta que, en lo posible, estas correspondieran al mismo mes del año, y que no coincidieran con los periodos de mayores precipitaciones, para así evitar interpretaciones equivocadas de los resultados.

El procedimiento se llevó a cabo con la herramienta Álgebra de Mapas, del software ArcGIS.

## NDVI Multitemporal

El cálculo del NDVI Multitemporal se basó en la comparación simultánea de tres periodos de tiempo de crecimiento vegetal diferentes. La correlación entre las bandas rojo, verde y azul con los valores temporales de NDVI 1, NDVI 2 y NDVI 3 permitió identificar en una sola imagen la presencia de vegetación como bosques, pastizales, herbazales y cultivos, agua cuerpos lóticos y lénticos o embalses o suelo desnudo correspondiente a suelos erosionados o áreas deforestadas, facilitando el análisis de los cambios en estas coberturas a lo largo del tiempo. (Figura 15)

A partir de la composición rojo, verde, azul (en inglés red, green, blue RGB) se muestra la combinación de periodos temporales para los entornos de análisis, permitiendo identificar elementos que aparecieron o desaparecieron a lo largo del tiempo. Por ejemplo, las tonalidades blancas muestran la presencia continua de vegetación, mientras que las tonalidades negras muestran ausencia continua de vegetación. Los otros colores muestran potenciales escenarios de presencia o ausencia de vegetación en cada uno de los tres momentos. (Figura 15)

El rojo indica ha habido pérdida de cobertura en el área en el transcurso del tiempo. El verde,

aumento de cobertura vegetal, y el blanco o plateado indica permanencia de la cobertura.

Ahora bien, para la obtención del NDVI multi-temporal se generaron primero los NDVI para los años 2002, 2008, 2018 y, posteriormente, con las herramientas de análisis de imágenes de ArcGIS, se combinaron los rásteres correspondientes a cada periodo de tiempo. La evidencia de los cambios en el terreno, así como la presencia o ausencia de vegetación, genera tonalidades rosadas y verdes.

### Cálculo del Índice de Diferencia Normalizada Edificada NDBI

Finalmente, se procedió a la obtención del índice de crecimiento urbano a partir de las bandas del infrarrojo cercano y del infrarrojo de onda corta, con el fin de determinar las áreas que han experimentado expansión urbana o que han sufrido mayores modificaciones por motivo de actividades humanas. Al igual que los otros índices, el intervalo de valores está entre -1 y 1, siendo los valores negativos los que

presentan zonas con vegetación; los valores intermedios, áreas de suelos desnudos o cultivos en crecimiento; y los valores positivos, zonas edificadas o con (n) infraestructura, facilitando, por lo tanto, la localización de los centros urbanos y otras obras civiles.

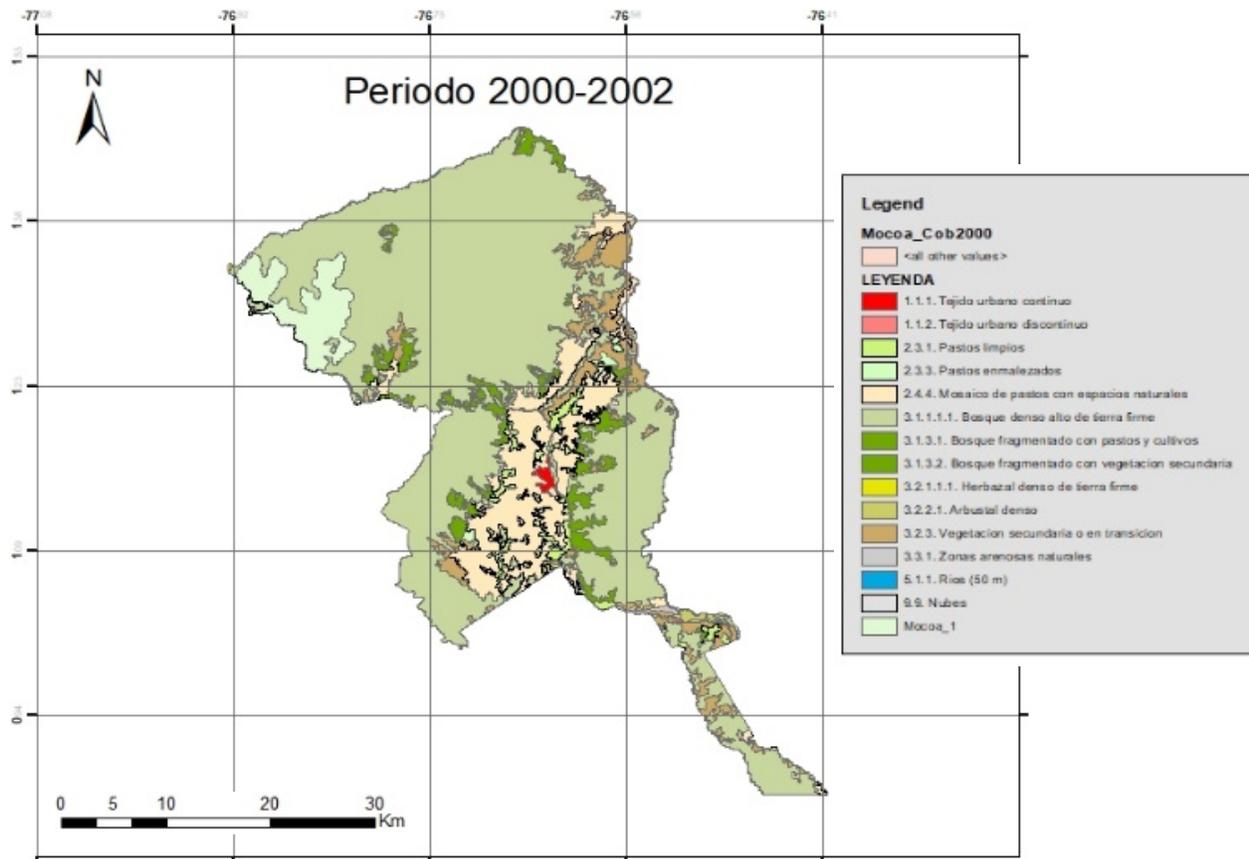
## Resultados y Discusión

### Análisis y cambios de coberturas

#### Periodo 1 (2000-2002, 2005-2009)

Para los periodos de tiempo 2000-2002 y 2005-2009 se observó que las coberturas que experimentaron mayores cambios fueron: pastos limpios, pastos enmalezados y mosaicos de pastos con espacios naturales. En cuanto a los pastos limpios, en el periodo I, (2000-2002) con un área de 29.82 km<sup>2</sup> la cual representa un 2.39 % del área estudiada, mientras que en el periodo II, (2005-2009) el área es de 39.36 km<sup>2</sup> con una representación del 3.01 %.

Figura 4. Mapa coberturas 2000-2002



Nota. Fuente: Propia.

Este incremento se debe al aumento de la demanda agrícola, ya que estos pastos son esenciales para la ganadería, junto con otras actividades agropecuarias.

En cuanto a la reducción de los pastos enmalezados, en el periodo I se contaba con un área de 5.29 km<sup>2</sup> correspondiente al 0.42 %, y para el periodo II, con un área de 0.92 km<sup>2</sup> y un porcentaje de 0.07 %. Se puede decir que la variación de dicho porcentaje se presentó por el aumento de pastos limpios ya que estos espacios de maleza pueden ser principalmente aprovechados para la siembra de pastos y otros cultivos (Figuras 4 y 5).

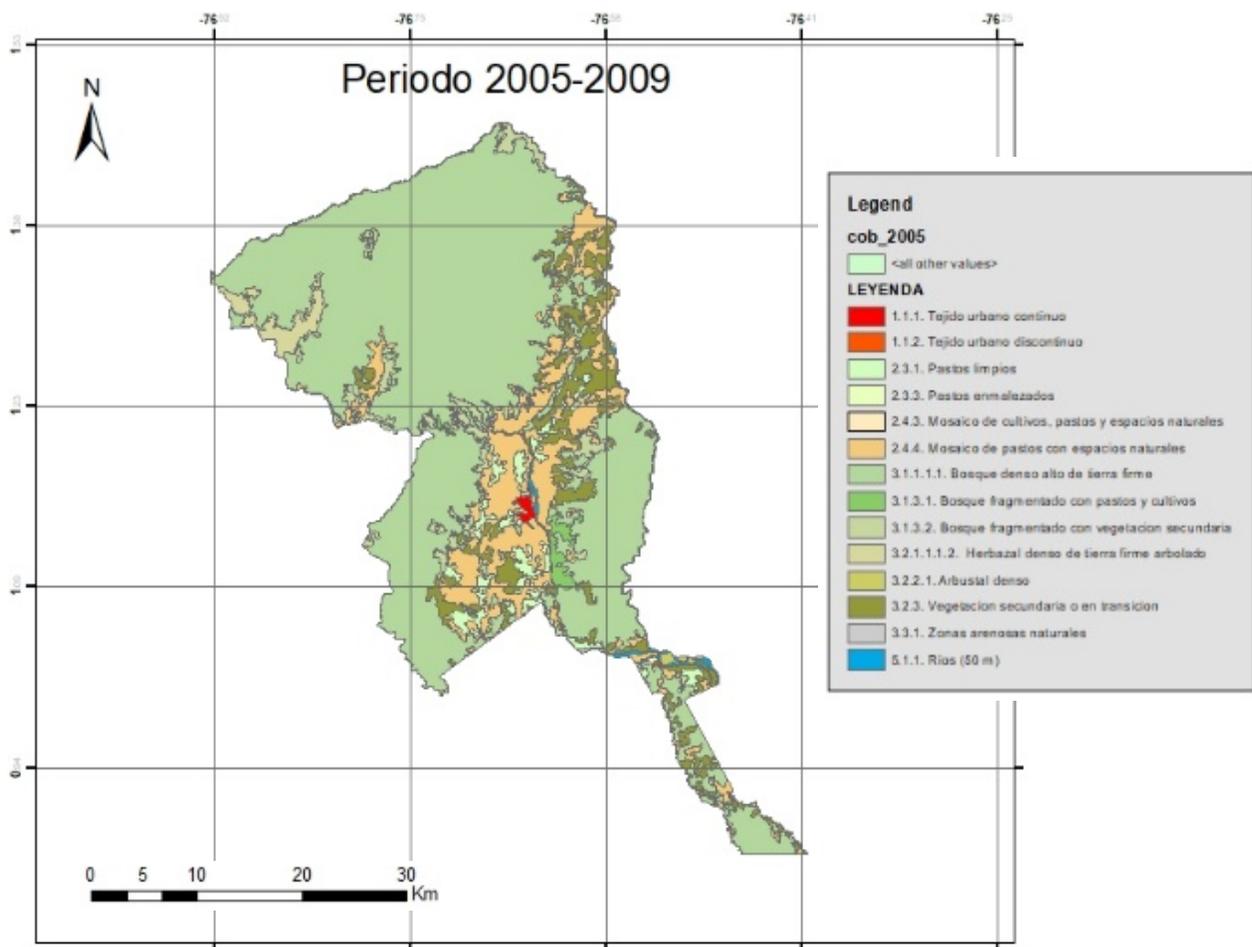
En cuanto a los bosques en general, herbazales, arbustales, vegetación secundaria y zonas naturales no se observó una notable variación entre estos dos periodos, debido a una incipiente expansión de la frontera agrícola y a la poca intensificación de otras

actividades económicas. En cuanto al área del tejido urbano, no se presentaron cambios significativos para el periodo analizado.

#### Periodo 2 (2010-2012, 2018)

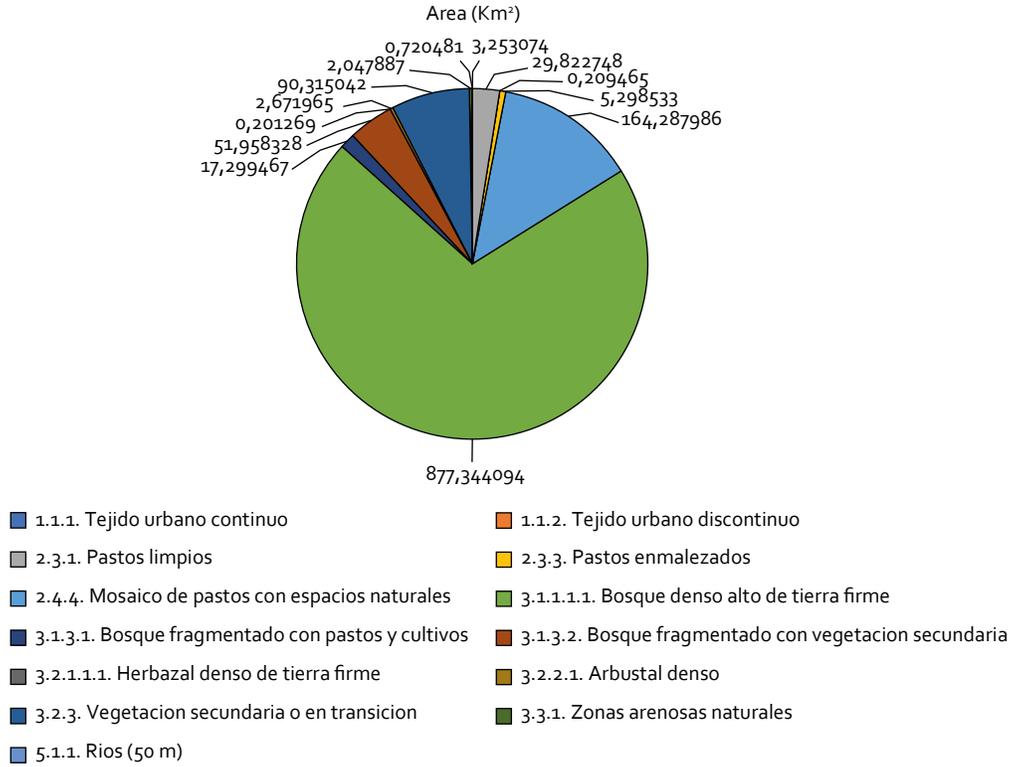
Para los periodos de tiempo entre los años (2010-2012) y (2018) se observó que las coberturas presentaron algunos cambios, los cuales fueron: pastos limpios, pastos enmalezados y en mosaicos de pastos con espacios naturales. Los pastos limpios en el periodo III contaban con un área igual a 39.32 km<sup>2</sup> lo que corresponde al 2.98 % del área estudiada, mientras que en el periodo IV, su área es igual a 19.84 km<sup>2</sup>, el cual representa un 1.54 %, esta reducción se debe a actividades del pastoreo que en la mayoría de ocasiones se presenta por el uso de pastos limpios para ganadería (Figuras 8 y 9).

Figura 5. Mapa coberturas 2005-2009



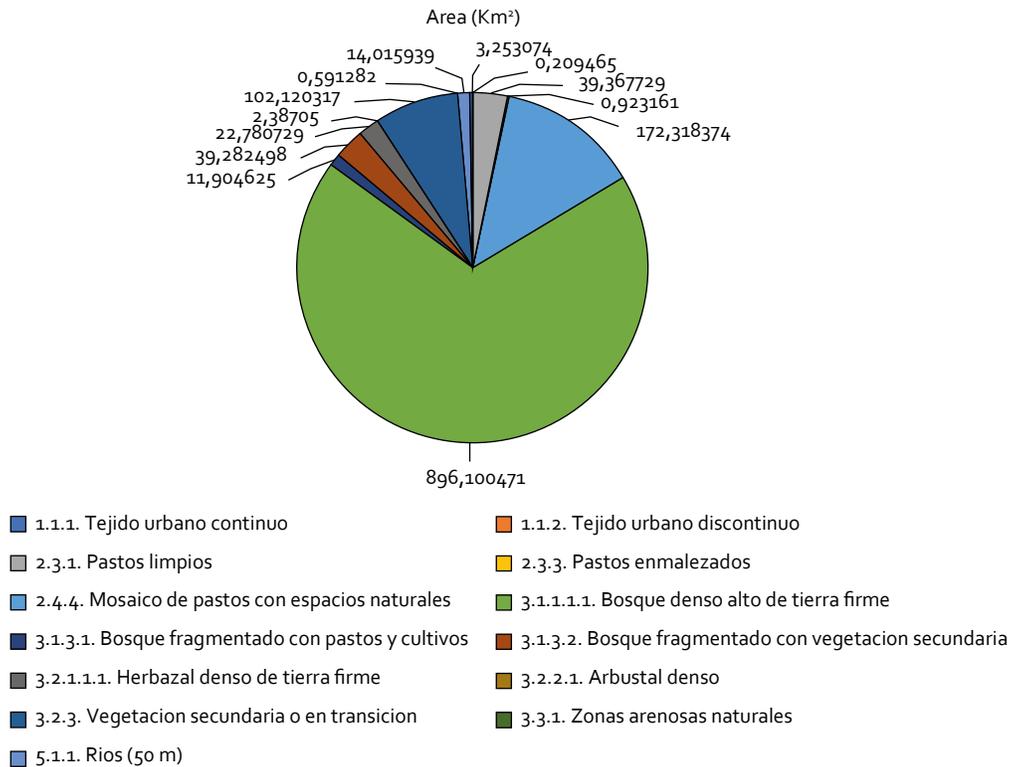
Nota. Fuente: Propia.

Figura 6. (Diagrama de torta periodo I correspondiente a los años 2000-2002)



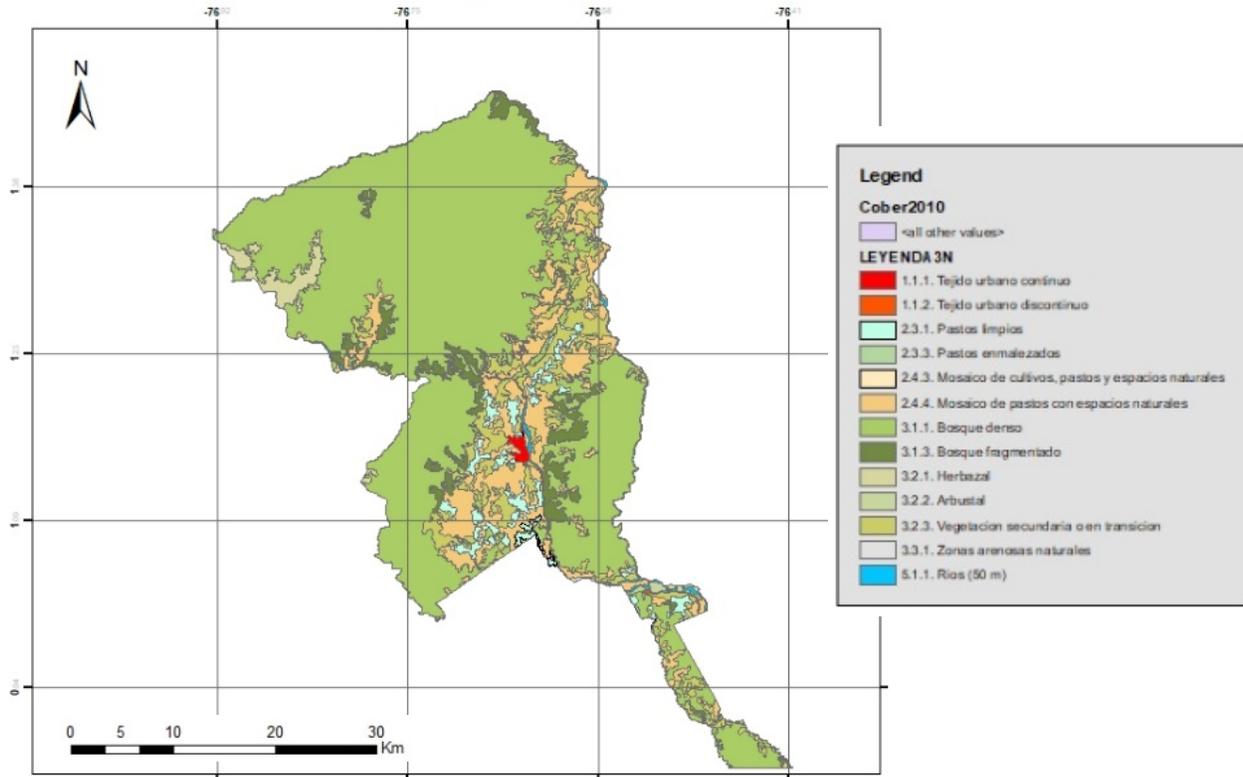
Nota. Fuente: Propia.

Figura 7. (Diagrama de torta periodo II correspondiente a los años 2005-2009)



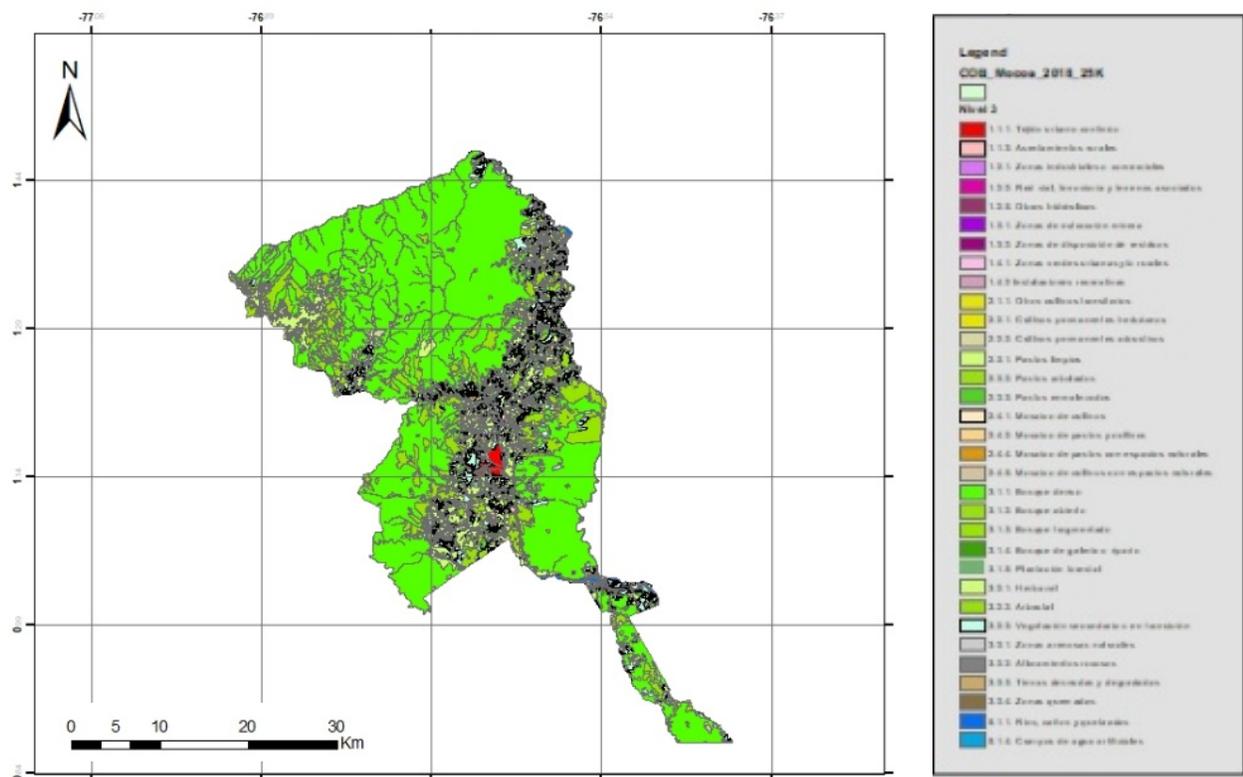
Nota. Fuente: Propia.

Figura 8. Mapa de Coberturas 2010-2012



Nota. Fuente: Propia.

Figura 9. Mapa de Coberturas 2018

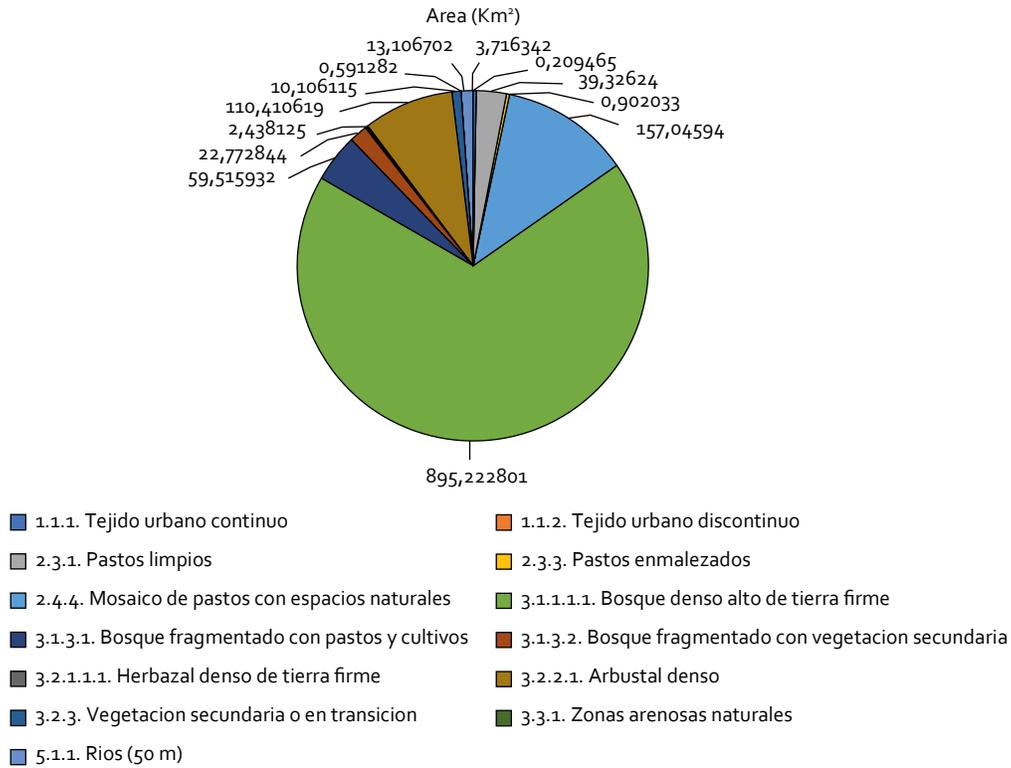


Nota. Fuente: Propia.

Para los pastos enmalezados, se identificó que en el primer lapso de tiempo el área era igual a 0.902 km<sup>2</sup>, los cuales corresponden al 0.067 %, mientras que en el 2018 su área aumenta considerablemente a 3,18 km<sup>2</sup> y un porcentaje de 0.25 % (Figuras 10 y 11).

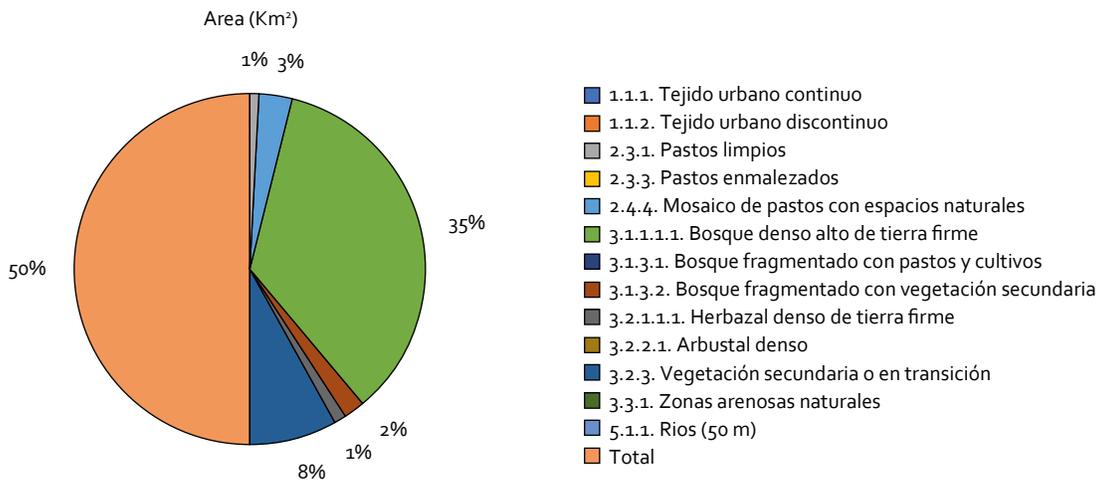
Referente al área del tejido urbano cabe resaltar que se presentó una variación poco significativa, no obstante, es necesario mencionarla, para el periodo comprendido entre el 2010-2012 el área urbana tenía un porcentaje de 0.30 %, mientras que para el 2018 el porcentaje de área era igual al 0.42 %.

Figura 10. (Diagrama de torta periodo III correspondiente a los años 2010-2012)



Nota. Fuente: Propia

Figura 11. (Diagrama de torta periodo IV correspondiente al año 2018)



Nota. Fuente: Propia.

### Periodo 3 (2000-2002, 2018)

Finalmente, se compararon los periodos I y III con el objetivo de calcular el porcentaje de cambios en las diferentes coberturas. Se identificó que en el último periodo hubo un aumento en el área de tejido urbano, asociado al incremento en la tasa de natalidad de los últimos años y a la llegada de población desplazada. Mientras que en el periodo inicial el área era de 3.25 km<sup>2</sup>, en el periodo final fue de 4.56 km<sup>2</sup>, lo que representa una diferencia de 1.31 km<sup>2</sup>.

Por otro lado, los pastos limpios, pastos enmalezados y mosaicos de pastos con espacios naturales mostraron una reducción de poco más del 40 %. En el periodo I, la suma de estos tres atributos era de 199.40 km<sup>2</sup>, mientras que en el periodo final fue de 98.17 km<sup>2</sup>, con una diferencia de 101.23 km<sup>2</sup> respecto al periodo inicial, y de 99.1 km<sup>2</sup> respecto al periodo intermedio.

Se presentó un aumento en las coberturas bosques, herbazales, arbustales, vegetación secundaria y zonas naturales, con diferencias de 143.14 km<sup>2</sup> respecto al periodo inicial y de 82.93 km<sup>2</sup> con el periodo intermedio, debido a las actividades antrópicas (Figuras 4, 9 y 11)<sup>1</sup>.

### Comparación NDVI periodos de tiempo

A partir de la comparación del NDVI para los periodos seleccionados (2002, 2008 y 2018), y de acuerdo con la disponibilidad de imágenes, se obtuvieron los siguientes resultados:

En el periodo I el valor máximo fue (0.54), lo que lo ubica en una clasificación de tipo *transición*: los ambientes que pasan por cambios que pueden ser naturales o artificiales y un valor mínimo de -0.37. Lo anterior indica que es una clasificación no forestal, es decir, una zona donde hay poca vegetación por eventos naturales o antrópicos. En cambio, con respecto al periodo II se observa claramente en la imagen y en los indicadores (-0.99) que las zonas no forestales aumentaron, probablemente ocasionadas por la tala de árboles, la deforestación general o la minería ilegal, y se ve un aumento en el indicador de vegetación, con un valor de 0.87, el cual corresponde a una clasificación forestal.

1 En este caso es importante que el lector compare los periodos 2000-2018 de las diferentes figuras mencionadas

Los valores de índice obtenidos para cada periodo confirman que las áreas calculadas para los mapas de coberturas muestran una correlación con los datos obtenidos a partir del NDVI, donde se aprecia un aumento de zonas forestales, de transición, y no forestales en ciertas áreas, pero una disminución en pastos limpios.

Figura 12. Índice NDVI 2002

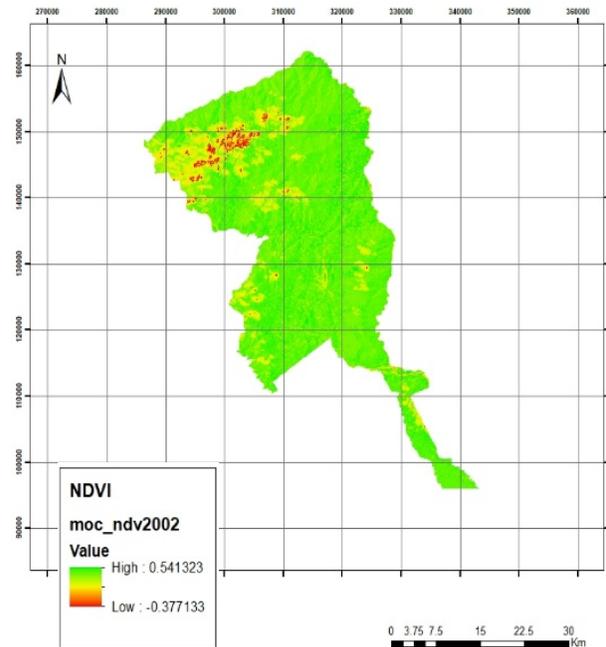


Figura 13. Índice NDVI 2008

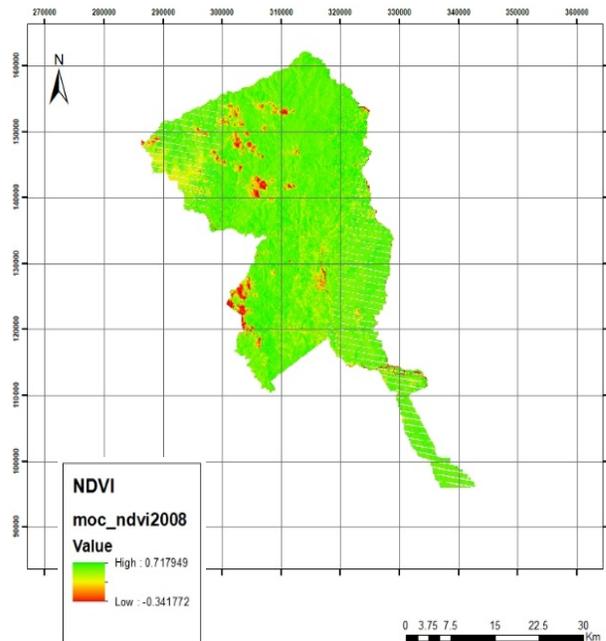
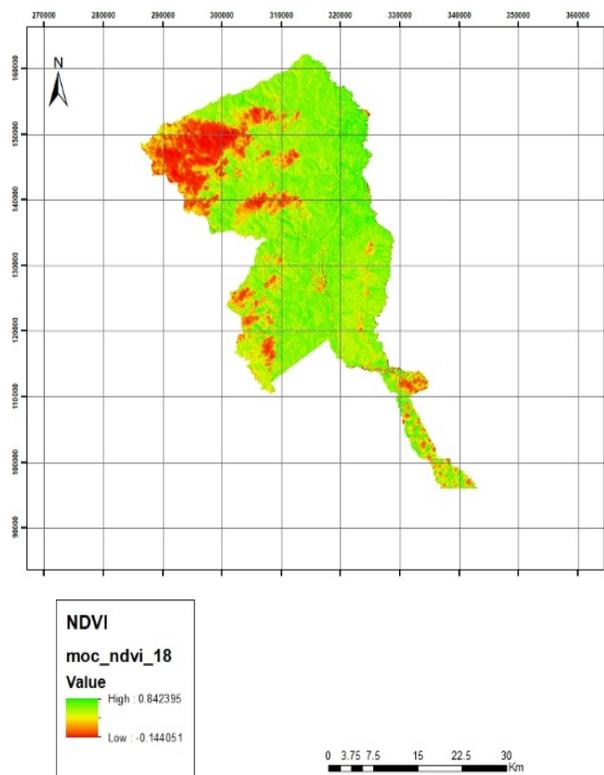
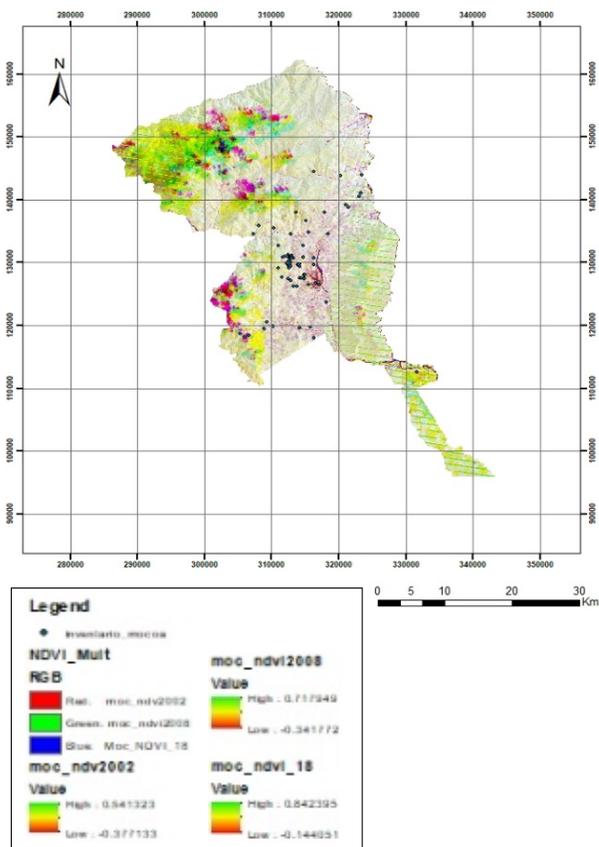


Figura 14. Índice NDVI 2018



Nota. Fuente: IDEAM

Figura 15. NDVI Multitemporal

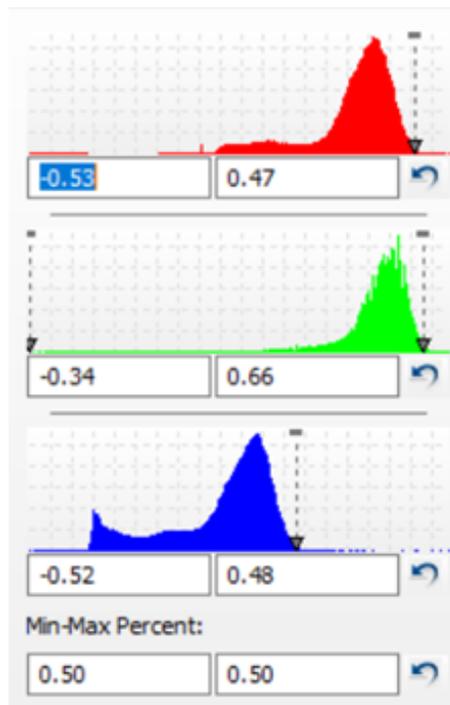


Nota. Fuente: IDEAM

### NDVI Multitemporal

El NDVI Multitemporal se obtuvo a partir de los NDVI para los años 2002, 2008 y 2018. Cada uno de los NDVI correspondientes a los tres periodos de tiempo se correlacionaron respectivamente con la banda roja, verde y azul, permitiendo obtener una imagen con una combinación de colores que facilita detectar las zonas que sufrieron mayores cambios en la cobertura vegetal y donde hay predominio de agua o suelos desnudos. Así, por ejemplo, la zona donde dominan los tonos rosados indica cambios notables en la vegetación y coincide con el sector en el que nacen los principales drenajes y donde se generan con mayor frecuencia los movimientos en masa, como se puede apreciar cuando se superpone la capa del inventario de movimientos en masa (Figura 15). El histograma muestra la variación en los valores del índice por periodo, el cual, por la distribución de los datos, no necesariamente reflejan una recuperación en la cobertura vegetal en toda la zona, por la distribución de los datos (Figura 16). De otra parte, es recomendable siempre acompañar este análisis de verificaciones en campo y del uso de otros índices e información complementaria.

Figura 16. Histograma NDVI Multitemporal



Nota. Fuente: IDEAM

## NDBI Comparación periodos de tiempo

El NDBI es un índice de área construida, según la proporción de construcción en cada pixel. Sus valores van de -1 a 1 e indican, en forma creciente, el área construida. La comparación entre los valores del índice NDVI y los obtenidos con el índice NDBI, proporciona mayor precisión en la detección

de los cambios en las coberturas. Para poder comparar los tres periodos de tiempo (figuras 17 a 19) de manera simultánea, como en el caso anterior, se procedió a realizar un análisis multitemporal cuyo histograma con la distribución de valores máximos y mínimos se puede ver en la figura 20, donde se

Figura 17. NDBI 2002

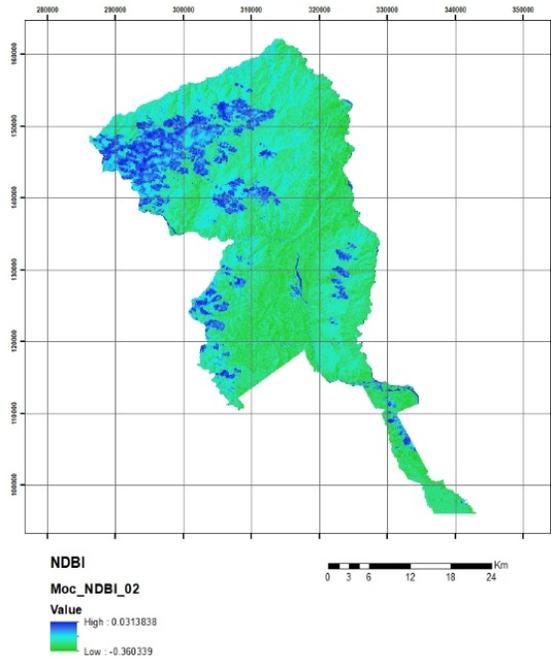


Figura 19. NDBI 2018

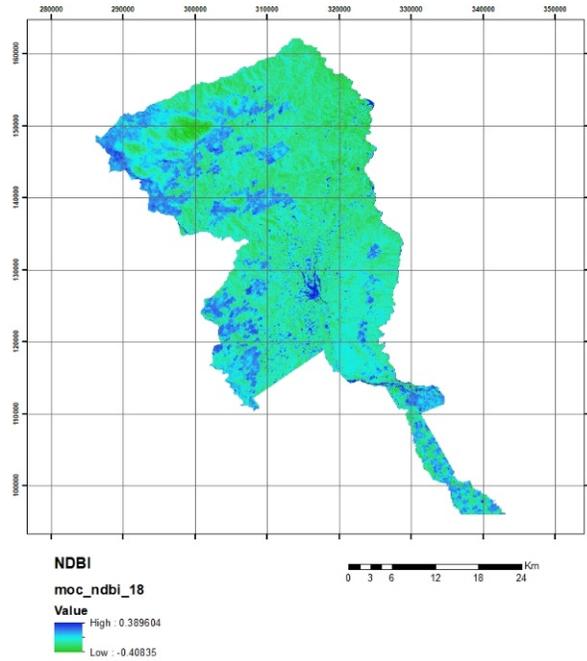


Figura 18. NDBI 2008

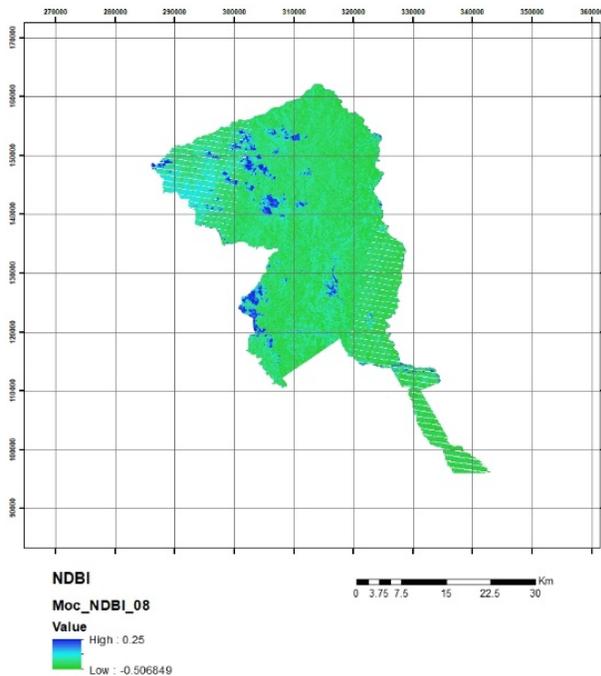
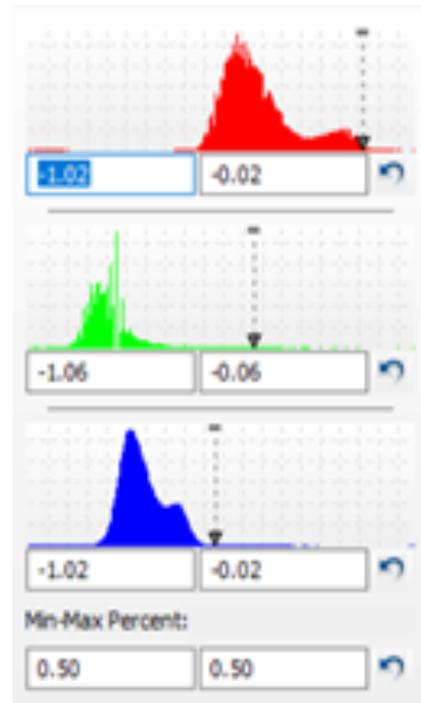


Figura 20. Histograma NDBI para los 3 periodos



verifica que los valores positivos aumentan para el último año de análisis.

## Conclusiones

- 1) El uso de los diferentes índices, comparado con los mapas de coberturas, proporciona información relevante relacionada con los cambios en las coberturas y el uso de suelo asociados con el crecimiento urbano y las actividades humanas, no obstante es importante verificar esta información con datos de diferentes fuentes y comprobación en campo, a fin de reducir interpretaciones erróneas derivadas de la resolución de los sensores empleados, de la presencia de nubes o de la escogencia de imágenes de diferentes meses.
- 2) Los análisis multitemporales realizados muestran la zona aledaña al casco urbano es la que ha experimentado mayores cambios en el periodo de observación, y coincide con el área donde son más frecuentes los movimientos en masa.
- 3) El crecimiento de la cobertura de tejido urbano se ha dado hacia las zonas cercanas a los principales drenajes que atraviesan el municipio de Mocoa, aumentando la vulnerabilidad a la afectación por avenidas torrenciales, como resultado de los asentamientos de personas desplazadas víctimas del conflicto armado del país.
- 4) El tipo de información generada en este tipo de trabajos constituye una herramienta que puede ser usada por las entidades territoriales para generar estrategias para prevenir y reducir el riesgo asociado a la ocurrencia de avenidas torrenciales, realizando una mejor planificación del territorio, ya que es evidente que las zonas más afectadas por los cambios en las coberturas son donde se presenta la mayor cantidad de movimientos en masa.

## Agradecimientos

A la Vicerrectoría de Investigaciones de la Universidad Militar Nueva Granada [UMNG], quien financió el proyecto de iniciación científica 3624.

## Conflictos de interés

La autora declara que no existen conflictos de interés asociados a la presente publicación.

## Bibliografía

- Acuña, A., 2019. Renovación Urbana, Vulnerabilidad y Resiliencia al Borde del Río Sangoyaco, Mocoa, Putumayo. Facultad de arquitectura y diseño, Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, Colombia.
- Acuña, A., 2018. Análisis multitemporal de áreas boscosas naturales a partir de un NDVI, y la influencia de las actividades antrópicas en el área límite entre Colombia y Ecuador. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/20741>
- Alcaldía Municipal de Mocoa, S.F., Información del Municipio, disponible en [www.mocoa-putumayo.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx](http://www.mocoa-putumayo.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx); consultado en septiembre 2022.
- Cebulski, J., 2022. Impact of river erosion on variances in colluvial movement and type for landslides in the Polish Outer Carpathians, Volume 217, 1-15. Doi: 10.1016/S0341816222004015
- Claessens, L., Knapen, A., Kitutu, M. G., Poesen, J., Deckers, J. A., 2007. Modelling landslide hazard, soil redistribution and sediment yield of landslides on the Ugandan footslopes of Mount Elgon, Volume 90, 1-13. Doi: 10.1016/S0169555X07000256
- ESRI, S.F., Función del NDVI, disponible en <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>, consultado en septiembre 2022.
- Glade, T., 2003. Landslide occurrence as a response to land use change: A review of evidence from New Zealand, 1-19. Doi: 10.1016/S0341-8162(02)00170-4
- Gutiérrez, F., Ortuño, M., Lucha, P., Guerrero, J., Acosta, E., Coratza, P., Piacentini, D., & Soldati, M. 2008. Late Quaternary episodic displacement on a sacking scarp in the central Spanish Pyrenees. Secondary paleoseismic evidence? 1-17. Doi: 10.3166/ga.21.187-202
- Haldar, S., Majumder, A., 2022. Changing nature of Land surface temperature and transformation of vegetation cover and water bodies in the 2nd largest urban agglomeration of West Bengal, Eastern India. Volume 27, 1-17. Doi: 10.1016/S2352938522001197
- Hao, L., van Westen, C., Rajaneesh, A., Sajin Kumar, K.S., Ranjan Martha, T., Jaiswal, P., 2019. Evaluating the relation between land use changes and the 2018 landslide disaster in Kerala, India, Volume 216, 1-13. Doi: 10.1016/S0341816222003496
- Huang S, Tang L, Hupy JP, Wang Y, Shao G. 2020. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular

- remote sensing. Volume 1-6. Doi: 10.1016/s11676-020-01155
- Hungr, O., McDougall, S., 2009. Two numerical models for landslide dynamic analysis, Volume 35, 1-15. Doi: 10.1016/S0098300408000289.
- Mugagga, F., Kakembo, V., Buyinza, M., 2012. Land use changes on the slopes of Mount Elgon and the implications for the occurrence of landslides, Volume 90, 1-8. Doi: 10.1016/S0341816211002049.
- Ngecu, W. M., Mathu, E. M., 1999. The El Nino triggered landslides and their socio-economic impacts on Kenya, Volume 22, 1-5. Doi:10.1007/S002540050425.
- Pisano, L., Zumpano, V., Malek, Ž., Roskopf, C.M., Parise, M., 2017. Variations in the susceptibility to landslides, as a consequence of land cover changes: A look to the past, and another towards the future, Volume 601-602, 1-13, Doi:10.1016/S0048969717313396.
- Promper, C., Puissant, A., Malet, J.-P., Glade, T., 2014. Analysis of land cover changes in the past and the future as contribution to landslide risk scenarios, Volume 53, 1-9, Doi:10.1016/S0143622814001155.
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A. C., Rossi, M., 2014. The Influence of Land Use Change on Landslide Susceptibility Zonation: The Briga Catchment Test Site (Messina, Italy), 1 - 13, DOI 10.1007/s00267-014-0357-0.
- Sheela, A., Ghermandi A., Vineetha P., Sheeja R., Justus J., Ajayakrishna K, 2017. Assessment of relation of land use characteristics with vector-borne diseases in tropical areas, Volume 63, 1-12, Doi: 10.1016/S0264837715301915.
- Shu, H., Hürlimann, M., Molowny-Horas, R., González, M., Pinyol, J., Abancó, C., Ma, J., 2019. Relation between land cover and landslide susceptibility in Val d'Aran, Pyrenees (Spain): Historical aspects, present situation and forward prediction, Volumen 693, 1-14. Doi: 10.1016/S0048969719334771.
- Williams, F., McColl, S., Fuller, I., Massey, C., Smith, H., Neverman, A., 2021. Intersection of fluvial incision and weak geologic structures cause divergence from a universal threshold slope model of landslide occurrence., Volume 389, 1-10. Doi:10.1016/S0169555X21002038
- Yang, S., Lunetta, R. S., Wheeler, B., Iames, J. S., & Campbell, J. B. (2016). An evaluation of time-series smoothing algorithms for land-cover classifications using MODIS-NDVI multi-temporal data. *Remote Sensing of Environment*, 174, 1-8. Doi: 10.1016/S0034425715302443.
- Zheng, Y., Tang, L., Wang, H., 2021. An improved approach for monitoring urban built-up areas by combining NPP-VIIRS nighttime light, NDVI, NDWI, and NDBI. Volume 328, 1-13. Doi: 10.1016/S0959652621036672